

# NVH-Testing in Zeiten des Technologiewandels

---

Marco Leonetti

<http://dx.doi.org/10.25673/103523>

## Abstract

In addition to new drive concepts, the technological transformation within the mobility sector also requires corresponding high-performance test facilities as an efficient development tool. In order to take account to the possible drive technologies, it is advisable to use the wheels as an interface between the drive system and the test bench. Thereby when designing a new NVH single-axle drive train test bench, the focus can be placed on safety and optimized acoustic decoupling, regardless of the test object. On the new NVH single-axle powertrain test bench, except purely electric drives can also be used to test axles powered by combustion engines and all types of hybrid power-trains. For this purpose, the test cell has a lower limit frequency of 125 Hz as well as the necessary fuel supply, exhaust gas extraction and appropriate room ventilation. Specially designed, self-supporting shaft assemblies within the fully anechoic test cell prevent possible transmission of structure-borne noise between the wheel machines, which are mounted separately outside the test cell, and the test object foundation. Manually moveable bearing blocks make it possible to cover track widths from the smallest car to light commercial vehicles without having to compromise on the quality of the airborne noise measurement.

Furthermore, regarding to the safety concept, an instructed user is able to enter the test cell at low speeds and torques and thus get an individual noise impression of the test objects. Fully variable networking of the test bench, including the technical rooms, and a concentration of the communication standards on EtherCAT and CAN enable efficient execution even with complex regulation and control tasks. Last but not least, a solid mechanical concept combined with modern automation software and an efficient application interface enables the user to examine even complex systems in a reproducible and high-quality manner with regard to all NVH issues.

## Kurzfassung

Die technologische Transformation innerhalb des Mobilitätssektors erfordert neben neuen Antriebskonzepten auch entsprechende leistungsfähige Prüfeinrichtungen als effizientes Entwicklungswerkzeug. Um dem breiter werdenden Spektrum an möglichen Antriebstechnologien gerecht zu werden, empfiehlt es sich, die Räder als Schnittstelle zwischen Antriebssystem und Prüfstand zu nutzen. Dadurch kann der Fokus bei der Konzeption eines neuen NVH-Einachs-Antriebsstrangprüfstand unabhängig vom Prüfobjekt auf Sicherheit und eine optimierte akustische Entkoppelung gelegt werden. Auf dem neuen NVH-Einachs-Antriebsstrangprüfstand können neben rein elektrischen Antrieben auch durch Verbrennungsmotoren angetriebene Achsen sowie alle Arten von hybriden Antriebssträngen untersucht werden. Hierfür besitzt die Prüfzelle eine untere Grenzfrequenz von 125 Hz, die notwendige Kraftstoffversorgung, Abgasabsaugung und eine entsprechende Raumlüftung.

Speziell konstruierte, freitragende Wellenstränge, innerhalb der vollreflexionsarmen Prüfzelle, verhindern hierbei eine mögliche Körperschallübertragung zwischen den außerhalb der Prüfzelle separat gelagerten Radmaschinen und dem Prüflingsfundament. Manuell verschiebbare Lagerböcke erlauben es, Spurweiten beginnend vom Kleinstwagen bis hin zu leichten Nutzfahrzeugen abzudecken, ohne dabei Abstriche bei der Qualität der Luftschallmessung machen zu müssen.

Weiterhin ist es durch ein ausgeklügeltes Sicherheitskonzept einem unterwiesenen Nutzer möglich, bei niedrigen Drehzahlen und Momenten die Prüfzelle zu betreten und sich dadurch einen individuellen Geräuscheindruck von den Prüfobjekten zu verschaffen.

Eine vollvariable Vernetzung des Prüfstands inklusive der Technikräume sowie eine Konzentration der Kommunikationsstandards auf EtherCAT und CAN ermöglicht auch bei komplexen Regelungs- und Steuerungsaufgaben eine effiziente Durchführung.

Nicht zuletzt wird der Nutzer durch ein solides, mechanisches Konzept kombiniert mit moderner Automatisierungssoftware und einer effizienten Applikationsschnittstelle befähigt, auch komplexe Systeme reproduzierbar und hinsichtlich aller NVH-Belange qualitativ hochwertig zu untersuchen.

## **1. Einleitung**

Neben der europäischen Fokussierung der Antriebstechnik auf batterieelektrische Fahrzeuge gibt es international eine starke Diversifizierung von Antriebskonzepten. Hybridantriebe, Brennstoffzellen und alternative Kraftstoffe rücken vermehrt in den Focus der Antriebsentwicklung. Die allermeisten Antriebsysteme werden als Soloachsantriebe konzipiert und entwickelt, um einen flexiblen Einsatz innerhalb und über Modellplattformen hinweg zu ermöglichen. Es liegt daher nahe, die Radnaben als optimale Schnittstelle zwischen Antrieb und Prüfeinrichtung zu verwenden.

Ein weiterer Schwerpunkt in der Planung eines neuen Prüfstandkonzepts war die Reduzierung des Ruhepegels sowie die Minimierung von Reflexionsflächen. Durch den Verzicht einer Lagerung der Wellenbrücke in der Prüfzelle konnte eine klare Trennung der Lagerung der Belastungseinrichtungen und des Prüflingsfundaments erfolgen. Dies wiederum reduziert auch die Reflexionsfläche an den Seiten des Prüflings erheblich.

## **2. Prüfstandkonzept**

Bei der Konzeption eines neuen NVH-Antriebsstrangprüfstandes (NVH-EAP) steht daher der Anspruch einer optimalen Luft- und Körperschallentkoppelung zwischen Prüfstand und Testobjekt im Zentrum. Eine neue und spezielle Herausforderung ergibt sich beim Achsprüfstand durch die Einstellung der Spurbreite. Eine Reduzierung auf technisch umsetzbare Konzepte erbrachte drei aussichtsreiche Ansätze. In Zusammenarbeit mit diversen Prüfstandslieferanten konnten aus Voruntersuchungen Kriterien zur Beurteilung der einzelnen Konzepte bezüglich technischer Funktion und Wirtschaftlichkeit abgeleitet werden (vgl. Tabelle 1).

Am Ende dieses Prozesses konnte die tectos GmbH als Partner und Lieferant für die Realisierung des Prüfstandes gewonnen werden.

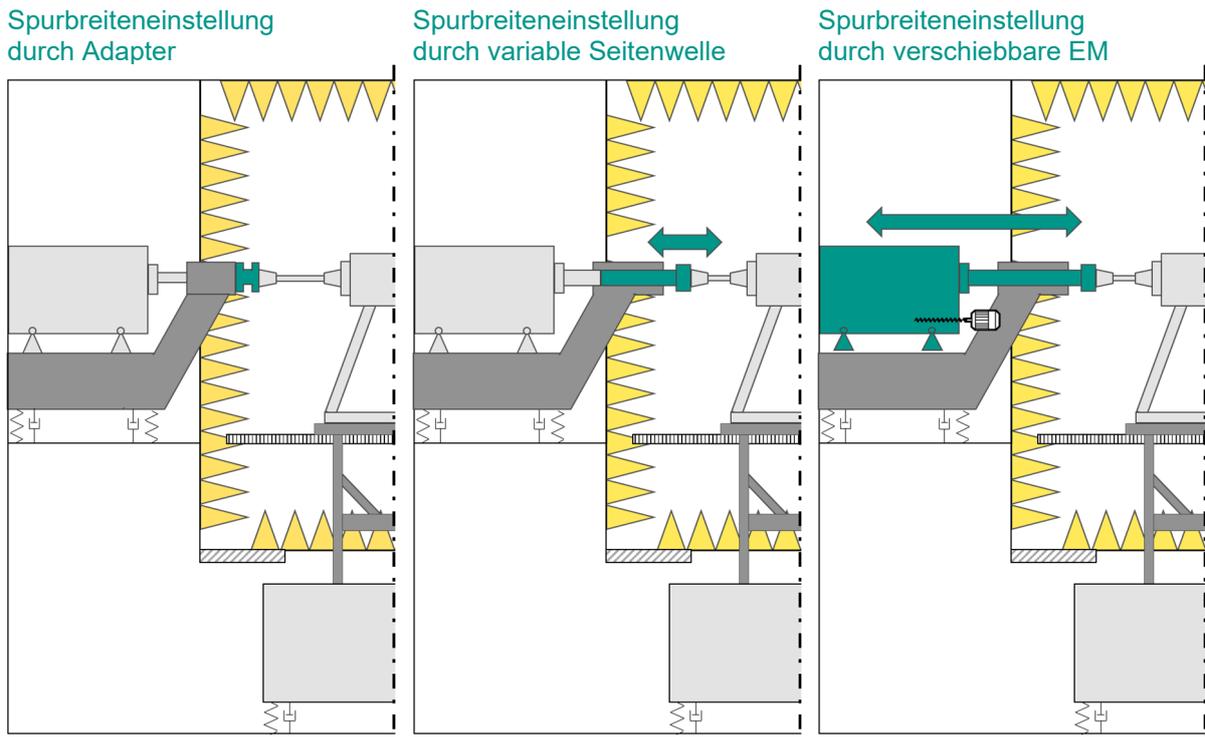


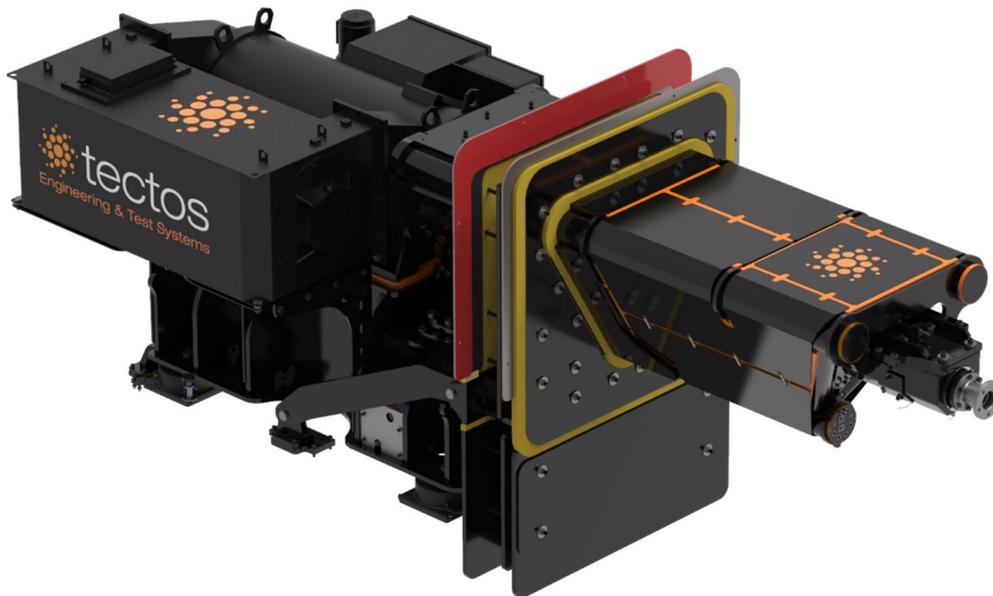
Abbildung 1: Untersuchte Konzepte

Tabelle 1: Konzeptbewertung

Konzept:	Adapter	variable Seitenwelle	verschiebbare EM
Kriterium: Initialkosten	+	--	---
Betriebskosten	--	++	-
Rüstzeiten	--	++	+
Schwingungsisoliation	+	+	+
Luftschallisolation	++	+++	---

## 2.1 Mechanische Komponenten

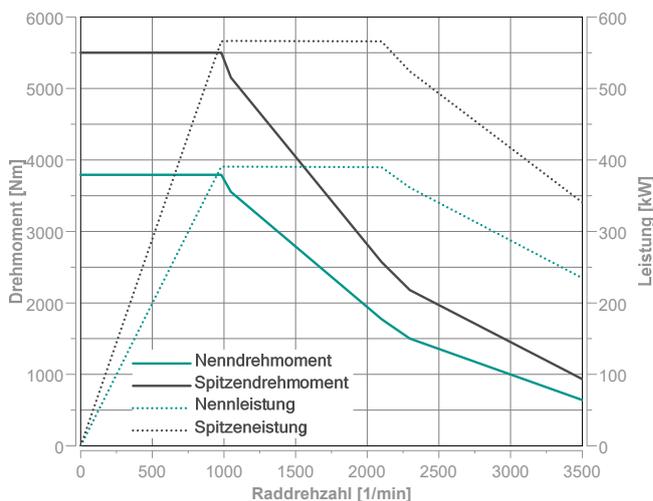
Als mechanische Belastungseinrichtung kommen Asynchronmaschinen zum Einsatz. Diese befinden sich in an die Prüfwelle angrenzenden Maschinenräumen. Über jeweils zwei doppelt gelagerte Zwischenwellen werden die Radflansche des Prüflings an die Antriebsmaschinen angebunden. Zur Darstellung von unterschiedlichen Spurweiten vom Kleinstwagen bis hin zum Transporter sind die beiden prüflingsnahen Wellen mit einer integrierten Längeneinstellung ausgestattet. Wellen, Lagerböcke und Längeneinstellung sind in speziellen, in die Prüfwelle hineinragenden Wellenbrücken gelagert (Abbildung 2). Diese Wellenbrücken weisen keine Lagerstellen in der Prüfwelle auf und sind die Kernkomponente für die Luft- und Körperschallisolation der Prüfwelle.



**Abbildung 2:** Radmaschine mit Wellenbrücke und Spurbreitenverstellung

Um im Falle einer Fehlfunktion eines Testobjekts Schäden an der Prüfeinrichtung zu vermeiden und um Tests an den Grenzen der Fahrbarkeit durchführen zu können, wurden hohe Leistungs- und Drehmomentwerte für den Prüfstand spezifiziert. Bei Leistung und Drehmoment der Radmaschinen muss zwischen nominaler Dauerleistung und kurzzeitiger Spitzenleistung unterschieden werden (vgl. Abbildung 3). Die Kombination von E-Motor und Frequenzumrichter ist kurzzeitig mit 50 % höherer Leistung zu betreiben. Um diese Überlastfähigkeit nutzen zu können, müssen die normalerweise quasistationären Testszenarien jedoch meist hinsichtlich Messdauer sowie der Anfahr- und Einschwingzeit optimiert werden.

Aus der daraus resultierenden Charakteristik der E-Maschinen ergibt sich eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 400 km/h.



Hersteller:	ELIN Motoren GmbH
Bauart:	Asynchronmaschine
Maximaldrehzahl:	3500 min <sup>-1</sup>
Nennleistung:	390 kW
Spitzenleistung:	560 kW
Nennmoment:	3500 Nm
Spitzendrehmoment:	5500 Nm
Eckdrehzahl:	980 min <sup>-1</sup>

**Abbildung 3:** Leistungs- und Drehmomentkurven einer Radmaschine

## 2.2 Wellen und Lagerungskonzept

Aufgrund der hohen Drehmomente und der großen Länge sind die Wellenstränge dreifach gelagert. Nach der Lagerung des Wellenausgangs der Asynchronmaschine befinden sich noch zwei Lagerböcke auf der Wellenbrücke. Die Wellen sind beidseitig mit speziell für diese Anwendung entwickelten homokinetischen Gelenken mit 12-Kugeln ausgestattet. Diese weisen eine hohe Torsionssteifigkeit auf und können gleichzeitig montagebedingte Achs- und Winkelversätze ausgleichen. Das optimierte Design weist im Vergleich zu herkömmlichen homokinetischen Gelenken ein deutlich geringeres Geräusch auf.

**Tabelle 2:** Komponenten eines Wellenstrangs

Pos.	Komponente	Fixierung	Beschreibung
1.	Asynchronmaschine	Mit Sockel verschraubt	
2.	Drehmomentmessflansch	An Rotor geschraubt	
3.	Zwischenwelle	Zwischen 2 und 4	Mit zwei 12-Kugel Homokinetlagern
4.	Fester Lagerbock	Positionsfest an Wellenbrücke	
5.	Verschiebewelle	Zwischen 4 und 6	
6.	Verschiebbarer Lagerbock	Verschiebbar an Wellenbrücke	
7.	Adapterflansch	An 6 verschraubt	Prüflingsindividuell je nach Radflansch und Lochkreis

Bei den Wellenbrücken wurde zu Gunsten einer besseren Körperschallentkoppelung und einer Reduzierung der Reflexionsfläche auf eine testobjektnahe Abstützung verzichtet. Die frei in die Prü fzelle hineinragenden Wellenbrücken werden über vorgespannte Stop-Choc-Elemente an den Sockel der Asynchronmaschine angebunden. Zusätzlich besitzen die Wellenbrücken innerhalb der Prü fzellenwand einen weiteren Lagerpunkt, welcher eine Rotation um die Horizontale ermöglicht (vgl. Abbildung 5). Der Sockel und die E-Maschine wirken so als Gegengewicht und halten die Wellenbrücke in Position. E-Maschine und Sockel sind in den Maschinenräumen auf Luftfedern gelagert, um den Transfer von Betriebsschwingungen hin zur Gebäudestruktur zu verhindern. Die Masse des Sockels und die Kennlinie der Luftfedern wurde dabei so ausgelegt, dass die aus den eingeleiteten Drehmomenten resultierenden Reaktionskräfte nur minimale Relativbewegungen hervorrufen.

Jeder Wellenstrang besitzt zwei Lagerböcke. Einen festen im Bereich der Prü fzellenwand und einen in Achsrichtung verschiebbaren nahe der Radposition. Beide Lagerböcke sind über Stop-Choc-Elemente gegenüber der Wellenbrücke entkoppelt montiert, wie am Beispiel des verschiebbaren Lagerbocks in Abbildung 4 erkennbar ist. Betriebsschwingungen aus Radiallagern und Gelenken werden daher stark bedämpft auf die Struktur der Wellenbrücken übertragen.

Die Wellenbrücken sind als Rohr-Schweißkonstruktion ausgeführt. Die Grundform eines auf dem Kopf stehenden Deltas ist das Resultat von Bauraumbedarf, Fertigungsanforderungen und Simulation des dynamischen Verhaltens. Die Fachwerkkonstruktion ist angelehnt an den Kranbau und hat dadurch ein gutes Verhältnis zwischen Eigengewicht und Steifigkeit. Die offenen Felder werden für Montage und Wartungsarbeiten benötigt. Die Rohre in Achsrichtung besitzen jeweils ein Innenrohr, welches zur

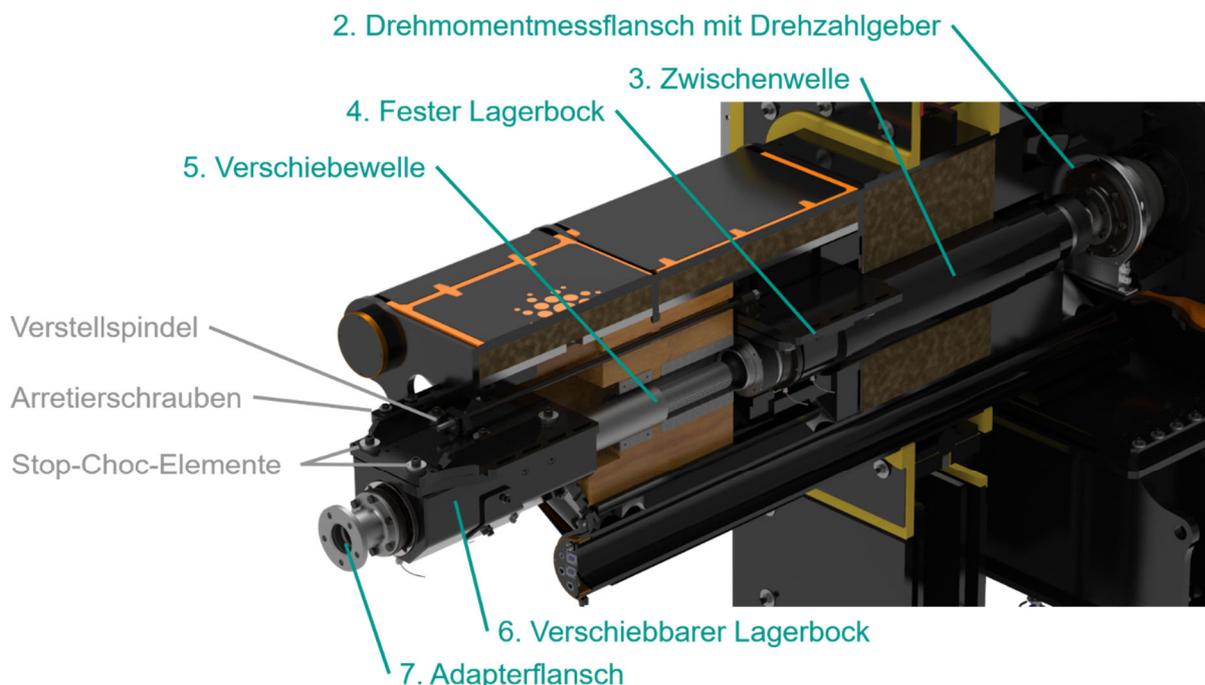
Leitungsführung verwendet wird. Die Hohlräume sind mit komprimierter Steinwolle gefüllt und Deckeln verschlossen. Die Querstreben des Fachwerks sind mit Sand gefüllt. Durch diese Maßnahmen wird zum einen gewährleistet, dass das Fachwerk eine hohe innere Dämpfung besitzt und daher nur schwer selbst zum Schwingen angeregt werden kann und zum anderen konnten die Eigenmoden durch gezielten Masseinsatz stark abgesenkt werden.

## 2.3 Spurbreitenverstellung

Um die Brücken möglichst klein zu halten, wurde auf einen elektrischen Antrieb und eine fremdbetätigte Arretierung der Spurweitenverstellung verzichtet.

Der vordere Lagerbock ist über eine spielfreie Welle mit Längenausgleich mit dem Lagerbock in der Wandebene verbunden. Von Minimum bis Maximum kann jeder Lagerbock um ca. 20 cm verschoben werden (vgl. Abbildung 4). Die eigentliche Verstellung erfolgt hierbei über eine Gewindespindel mit Sechskant und kann über einen Schlüssel oder einen Akkuschauber bedient werden. Nach der Verstellung wird der Schlitten über Schrauben auf der Wellenbrücke fixiert. Eine Einstellung der Spurbreite ist mit wenigen Handgriffen in weniger als 30 Minuten durchzuführen.

Um den Drehklang der Wellenstränge möglichst klein zu halten, wurde bei der Konstruktion viel Wert auf geschlossene rotierende Oberflächen gelegt. Schraubenköpfe und Wuchtmarken sind hinter geschlossenen Deckeln verborgen, um die Luftbewegung zu minimieren. Zur weiteren akustischen Optimierung und auch zur Reduzierung des möglichen Schadens bei Versagen sind die über die Wellenbrücke hinausragenden, drehenden Teile durch ein Metallschild bis hin zum Lagerbock gekapselt. Diese Maßnahme ist auch für das Sicherheitskonzept hinsichtlich des Personenschutzes wichtig.



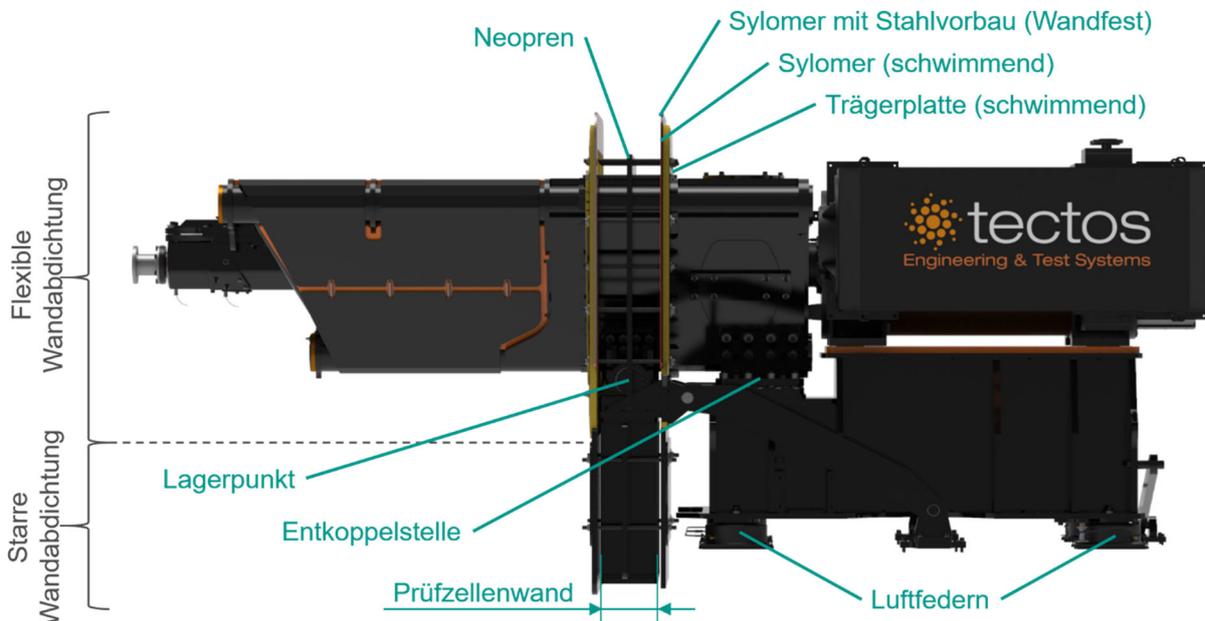
**Abbildung 4:** Komponenten eines Wellenstrangs

## 2.4 Luftschallisolation

Zur Realisierung eines niedrigen Ruheschallpegels in der Prüfzelle ( $< 35 \text{ dB (A)}$ ) sind hinsichtlich der Wellenbrücken zwei Hauptpunkte entscheidend.

Zuerst müssen die Geräusche aus den Maschinenräumen möglichst hoch bedämpft werden. Die Wellenbrücke ist hierfür zusätzlich zum Bremsensockel auch auf einem separaten Sockel in der Wand gelagert. Dieser Wandsockel an sich ist fest mit dem Untergrund verbunden, jedoch nicht mit angrenzenden Wandbereichen. Hohlräume zwischen Wandsockel, der Außenkontur der Wellenbrücken und dem rechteckigen Wandausschnitt sind mit wechselnden Schichten aus Steinwolle und Neopren als Sperrschichten verfüllt, um über die Impedanzänderungen beim Stoffwechsel möglichst viel Schallenergie abzubauen und so ein optimales Dämmungsergebnis zu erzielen.

Im darüber befindlichen Bereich der Deltakontur kann es im Falle eines Defekts an den Luftfedern zu einer Relativbewegung in der Größenordnung bis zu zwei Zentimetern kommen. Dieser notwendige Freiraum kann daher nicht wie die Wandbereiche rund um den Wandsockel fest mit Stahlplatten verschlossen werden, sondern wird durch elastisches Material, in diesem Fall Sylomer, verschlossen. Dies schließt nicht nur die Hohlräume, sondern sorgt auch dafür, dass die Füllstoffe der Wand nicht austreten können. Um die Sylomerplatten in Position zu halten, sind beidseitig auf der Wand schwimmende Stahlplatten angebracht. Diese halten sich gegenseitig über durch Druckfedern vorgespannte Stahlanker in Position. Dadurch wird auch im Schadensfall eine Beschädigung der Wellenbrücken und des Dämmmaterials verhindert und auch eine optimale Luftschallisolation bleibt gewährleistet.



**Abbildung 5:** Wandabdichtung

Als zweites muss die Innenkontur der Wellenbrücken optimal verschlossen sein. Kernpunkt ist hierbei der direkt in der Wandebene befindliche Lagerbock. Um ihn herum lässt sich die Wellenbrücke in sich spaltfrei schließen. Die Radiallager sind geschlossen ausgeführt, sodass auch in der Lagerung keine Luftschallbrücke existiert. Die Hohlräume in der Fachwerkstruktur auf Seiten der Prüfzelle und der Maschinenräume

werden formschlüssig mit Basotect- und Ikalonteilen gefüllt. Hierbei werden nur die Bereiche in nächster Nähe zu drehenden Teilen ausgespart um eine möglichst hohe Absorption zu erzielen.

Die Oberfläche der Wellenbrücke innerhalb der Prüfwelle wird noch einmal durch zwei Schichten Neopren verschlossen. Die obere Schicht (orange Ummantelung in Abbildung 5) ist eng an der Außenkontur angelegt und dient dabei auch als Schmutzschutz für die inneren Komponenten. Als Berührschutz kommen dann noch lackierte Lochbleche zum Einsatz, die schwimmend auf der Neoprenhülle fixiert sind. Um den Mechanismus der Spurbreitenverstellung bedienen zu können, ist im vorderen Bereich ein demontierbares Stück vorgesehen, das mit einem Reißverschluss einfach zu öffnen ist.

### **3. Elektrische Komponenten**

Die elektrischen Komponenten haben einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der gemessenen Daten. Zunächst sollen sie selbst möglichst leise und schwingungsarm sein, darüber hinaus können geschickte Lösungen auch die Abläufe smarter und effizienter gestalten.

#### **3.1 Asynchronmaschinen und Frequenzumrichter**

Trotz der aufwendigen Luftschallisolation wurde bei der technischen Umsetzung der E-Maschinen auf ein möglichst niedriges Geräuschniveau geachtet. Die E-Maschine besitzt von Haus aus einen zweigeteilten Wasserkreis. Der Stator wird direkt durch einen Wassermantel gekühlt. Der Rotor ist luftgekühlt, es kommt aber ein Aufsatzkühler mit Kühlregister und geschlossener Luftführung zum Einsatz, welcher laut Hersteller die Geräuschemissionen im Gegensatz zur offenen Variante um 10 dB reduziert. Auch die Wasserkühlung an sich kann Vibrationen hervorrufen. Bei zu hohen Durchflussmengen würden tieffrequente Vibrationen entstehen, weshalb diese durch einzelne Strangreguliertventile für Rotor- und Stator Kühlung begrenzt werden, ohne dabei Abstriche bei der Kühlung machen zu müssen.

Die Frequenzumrichter arbeiten nicht mit einer festen Grundfrequenz. ABB bietet bei den gewählten Umrichtern der 880-Baureihe einen frequenzmodulierten Betriebsmodus. Hierbei wird die Frequenz stochastisch zwischen 4 und 7 kHz moduliert, sodass sich die typischen tonalen Komponenten des Invertergeräuschs nicht ausprägen können und die elektrischen Geräuschanteile der E-Maschine deutlich reduziert werden. Die Frequenzumrichter an sich sind aus betriebswirtschaftlichen Gründen nicht wassergekühlt. Ihre Luftkühlung kann unter ungünstigen Randbedingungen Schalldruckpegel über 80 dB(A) hervorrufen. Aus diesem Grund wurden die Umrichter nicht in direkt an die Prüfwelle angrenzende Räume untergebracht, sondern im Untergeschoss.

Im am häufigsten eingesetzten Regelungskonzept übernehmen die Radmaschinen die Drehzahlregelung des Testobjekts. Das Testobjekt selbst stellt entsprechend das erforderliche Drehmoment. Hierbei erlauben die eingesetzten Umrichter eine Onlineanpassung der Regelparameter des Drehzahlreglers. Hierdurch können ohne Pausen im Testablauf unterschiedlichste Testzyklen mit für diese optimalen Regelparametern gefahren werden.

Darüber hinaus lassen sich auch die Momentenfreigaben der Radmaschinen online begrenzen, um z.B. beim Anfahren Schäden an Testobjekten aufgrund von klemmenden oder blockierten Komponenten zu vermeiden.

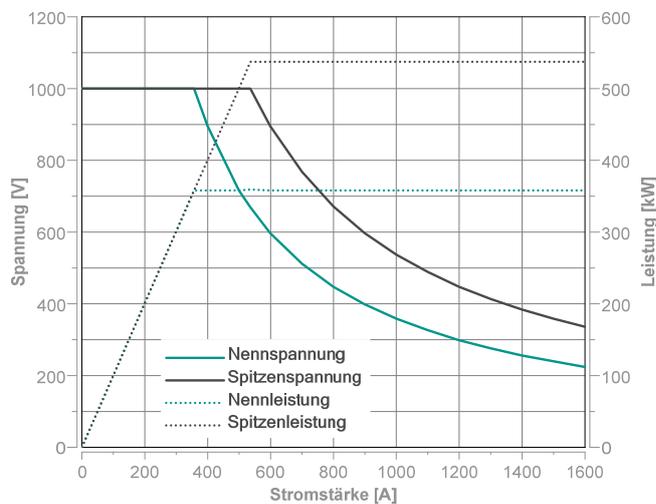
**Tabelle 3: Kenndaten der Frequenzumrichter**

Hersteller:	ABB
Typ:	ACS880
Ansteuerung:	EtherCAT
Drehzahlerfassung:	Resolver an Asynchronmaschine
Nennleistung:	560 kW
Maximalstrom:	1020 A

### 3.2 Batteriesimulation

Die Batteriesimulation ist aus Sicht des Betriebs von elektrischen Antrieben eine Kernkomponente. Sie stellt dem Prüfling die notwendige elektrische Leistung zur Verfügung und muss gleichzeitig hochdynamisch das Versagen von Prüflingkomponenten erkennen, um einen hinreichenden Personenschutz zu gewährleisten.

Aus NVH-Sicht ist die Batteriesimulation eine unkritische Komponente. 95% der abzuführenden Wärme wird direkt an eine Wasserkühlung abgegeben, welche fast geräuschlos arbeitet.



**Abbildung 6: Leistungskurven der Batteriesimulation**

Hersteller:	KS Engineers
Maximalstrom:	1600 A
Maximalspannung:	1000 V
Regelfrequenz:	4 kHz
Dynamik Strom:	<1ms für 1600 A
Nennleistung:	358 kW
Eckstrom Nenn.:	358 A
Spitzenleistung:	537 kW
Eckstrom Spitze:	537 A

### 3.3 Spannungsübergabe / Interfacebox

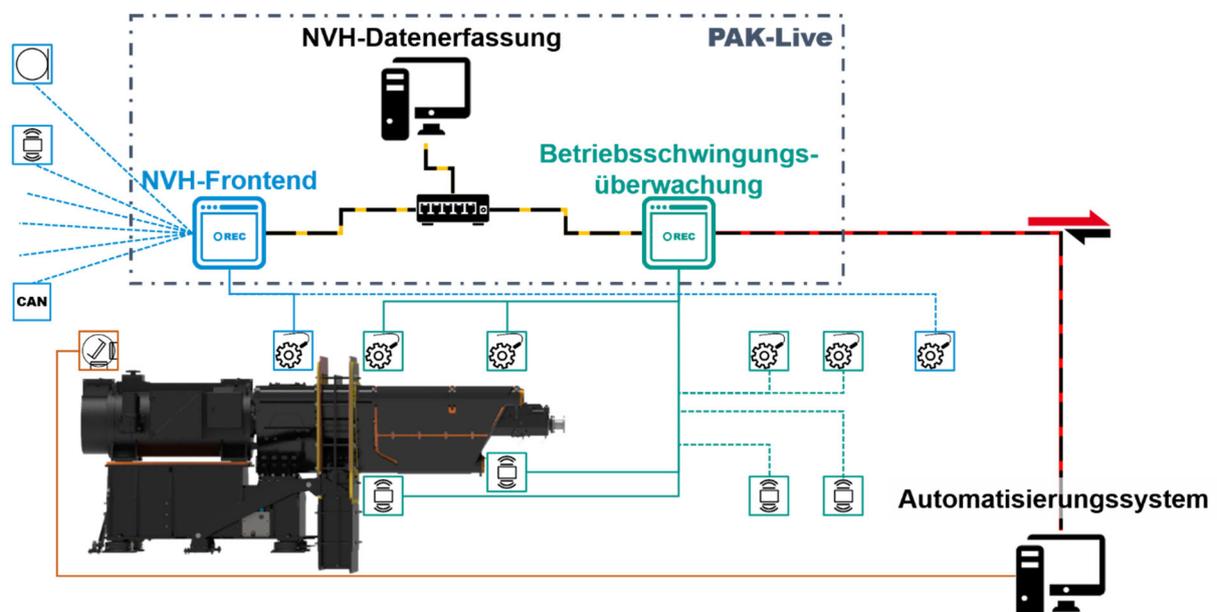
Ein für die Reflexionsfläche in Prüfständen für elektrische Antriebe nicht unerheblicher Aspekt ist der Anschlusspunkt von testobjektspezifischen Leitungssätzen an die prüfstands-festen Zuleitungen der Batteriesimulation. Einen Kompromiss zu finden zwischen einer möglichst testobjektnahen Schnittstelle, um Fahrzeugleitungssätze verwenden zu können und einer minimalen Reflexionsfläche ist nicht einfach. Zugänglichkeit ist bei jedem Testobjektwechsel sicherzustellen und sollte deshalb schnell und

einfach möglich sein. Als Kompromiss konnte eine Anschlussbox unter dem begehbaren Gitterboden installiert werden, sodass die Box keine zum Testobjekt parallele Fläche bildet. Somit wird eine direkte Reflexion zurück auf den Prüfling verhindert.

### 3.4 Betriebsschwingungsüberwachung

Um eine kontinuierliche und effiziente Auftragsbearbeitung zu gewährleisten, sind die Wellenstränge mit einer Betriebsschwingungsüberwachung ausgerüstet. Auf jedem der Lagerböcke sitzt ein Triax-Beschleunigungsaufnehmer. Mit diesen ist es möglich, Veränderungen z.B. durch Verschleiß an den Wälzlagern oder sich vergrößernde Unwuchten an einer der Wellen frühzeitig zu detektieren und eine entsprechende Wartung einzuplanen, ohne dass es zu langen Ausfallzeiten kommt. Unterstützt wird das System durch eine Temperaturmessstelle an jedem Wälzlager, sodass auch erhöhte Reibung als Indikator für anstehende Arbeiten dient.

Da auch das Testobjekt ein Teil des Torsionsschwingungssystems ist, auf dessen Steifigkeit und Dämpfung in der Konzeption nur anhand einiger weniger schon existierender Beispiele Rücksicht genommen werden konnte, werden zusätzlich pro Wellenseite noch zwei weitere Geberringe zur Drehzahlerfassung an den homokinetischen Gelenken appliziert. Über diese ist es online möglich, unerwünscht auftretende Drehschwingungen schnell zu identifizieren und Abhilfemaßnahmen zu ergreifen. Die Kommunikation mit dem Automatisierungssystem erfolgt dabei über EtherCAT. Neben Rohwerten wie bei den Drehzahlen oder den RMS-Werten der Schwingschnellen können auch vorberechnete Kennwerte zum Vitalitätszustand der Wellenstränge ans Automatisierungssystem übertragen und dort weiterverarbeitet werden. Dies ermöglicht es, kritische Betriebszustände direkt online zu identifizieren.



**Abbildung 7:** Integration der Betriebsschwingungsüberwachung in das Prüfstandsumfeld

Sollte es notwendig sein, lassen sich die Signale der Betriebsschwingungsüberwachung auch mit dem NVH-Messsystem aufzeichnen und analysieren. Somit können am Testobjekt auftretende Phänomene direkt mit den Signalen der Wellenbrücken abgeglichen werden.

## 4. Sicherheit

Der Wunsch, an einem NVH-Prüfstand direkte Geräuschbewertungen vor Ort in der Prüfzelle vornehmen zu können, steht in direktem Widerspruch zu den Forderungen des Personenschutzes gemäß DIN EN ISO 13849:2016-06. Um den Zutritt zur Prüfzelle während des Betriebs dennoch zu ermöglichen, wurde eine Sicherheitsschaltung entwickelt, die unter regulären Bedingungen einen für das Personal sicheren Betrieb gewährleistet, es aber unterwiesenen Spezialisten erlaubt, bei niederen Raddrehzahlen und -momenten die Prüfzelle zu betreten, um sich einen Eindruck von den akustischen Eigenschaften des Testobjekts zu verschaffen.

Eine kontinuierliche und redundante Erfassung der Drehzahlen und Drehmomente sowie ein hinsichtlich Personenschäden unkritisches Notabschaltprogramm mussten hierfür installiert und zertifiziert werden.

Um das in [1] geforderte „Performance Level d“ für die Erfassung der Drehzahlen zu erreichen, ist es notwendig, ein absolut ausfallsicheres System einzusetzen. Hierfür werden für jeden Wellenstrang die Signale des Resolvers der E-Maschine aus dem Frequenzumrichter sowie die Drehzahlspur des Inkrementalgebers des Drehmomentmessflansches erfasst und kontinuierlich abgeglichen, um einen eventuellen Ausfall eines der Systeme ausschließen zu können. Erst hierdurch ist es möglich, eine im Sinne von [1] sichere Drehzahl überwachen zu können. Durch dieses und ähnliche Systeme ist es möglich, sich nach vorheriger Freigabe durch einen Schlüsselschalter bis zu einer maximalen Raddrehzahl von  $\pm 800 \text{ min}^{-1}$  und einem Drehmoment von  $\pm 400 \text{ Nm}$  in der Prüfzelle aufzuhalten. In diesem für den Geräuschkomfort relevanten Betriebsbereich können so schnell und einfach subjektive Beurteilungen der Testobjekte vorgenommen werden.

## 5. Zusammenfassung

Die Grundlage, um NVH Untersuchungen an elektrischen und hybriden Antriebsachsen auf technisch hohem Niveau und zu wirtschaftlich wettbewerbsfähigen Konditionen durchführen zu können, bildet die Integration einer robusten Wellenstrangmechanik in eine vollreflexionsarme Prüfzelle. Bereits in der konzeptionellen Phase muss Raum für akustische Maßnahmen berücksichtigt werden. Zum einen bedarf es einer Wandabdichtung ohne nennenswerte Relativbewegungen sowie kombinierte Kapselungs- und Absorptionsmaßnahmen um die drehende und in Ihrer Länge verstellbaren Wellen. Eine konsequent reflexionsminimierte Positionierung aller notwendigen Installationen innerhalb der Prüfzelle und eine strikte Schwingungsisolierung tragen zu einem optimalen Ergebnis bei.

Die Integration zusätzlicher Sensorik zur Detektion von Vibrationen und Drehschwingungen in die Prüfstandsmechanik, sowie die Kombination mit der Prüflingssensorik, eröffnen die Möglichkeit, Wechselwirkungen zwischen Testobjekt und Prüfstand zu identifizieren und zu optimieren.

Bedanken möchte ich mich bei Dieter Höfler und dem gesamten tectos Team für ein tolles Projekt mit einer hervorragenden Umsetzung.

## Literatur

- [1] DIN e.V. (Hrsg.): DIN EN ISO 13849-1:2016-06 Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleit-sätze (ISO 13849-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2015